

· БЕЛОРУССКИЙ ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО  
ЗНАМЕНИ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

---

*Для служебного пользования*

*Экв. № 99*

**ЛЫЧЕВ Петр Васильевич**

**Повышение эффективности электропередач  
со сверхпроводящими кабелями в системах  
электроснабжения крупных городов**

05.14.02 — Электрические станции (электрическая  
часть), сети и системы и управление ими

**А В Т О Р Е Ф Е Р А Т**  
**диссертации на соискание ученой степени**  
**кандидата технических наук**

**М и н с к 1 9 8 2**

УДК 621.315.2:537.312.62

Работа выполнена на кафедре "Электрические системы" Белорусского ордена Трудового Красного Знамени политехнического института.

- Научный руководитель - кандидат технических наук, доцент ФЕДИН В.Г.
- Официальные оппоненты: доктор технических наук ЛУКОВНИКОВ В.И.; кандидат технических наук, старший научный сотрудник БЛИНКОВ Е.Л.
- Ведущее предприятие - проблемная лаборатория электрических систем Московского энергетического института

Защита состоится "24" июня 1982 г. в 10 часов на заседании специализированного совета К 056.02.02 в Белорусском ордена Трудового Красного Знамени политехническом институте по адресу: 220027, г. Минск, Ленинский проспект, 65.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Белорусского политехнического института.

Автореферат разослан "22" мая 1982 г.

Секретарь  
специализированного совета,  
технических наук,

А.Н.Герасимович

*Гера Герасимович*

Белорусский политехнический  
институт  
1982.

Актуальность темы. На XXVI съезде КПСС в числе важнейших названа задача "всемерной экономии всех видов ресурсов", в том числе и топливно-энергетических. Это отмечалось и на ноябрьском (1981 г.) Пленуме ЦК КПСС.

Экономия топливно-энергетических ресурсов при производстве и передаче электроэнергии в значительной степени обеспечивается выравниванием графиков нагрузки электростанций и совершенствованием электропередач и их отдельных элементов. Большими возможностями в этом плане обладают электропередачи, выполненные на основе сверхпроводящих кабелей (СПК). Однако известные конструкции кабелей переменного тока и разработанные на их основе электропередачи характеризуются сравнительно низкими технико-экономическими показателями.

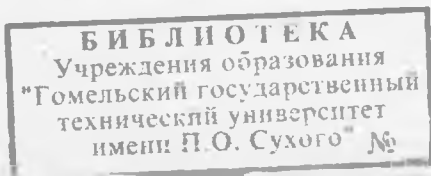
В связи с этим решение вопросов, связанных с совершенствованием электропередач с СПК, с целью повышения эффективности систем электроснабжения представляется актуальным.

Рассмотренные в диссертации вопросы связаны с программой работ Госкомитета СССР по науке и технике по решению научно-технической проблемы "Создать новые виды электротехнического оборудования с использованием сверхпроводимости" (программа О.14.02) и являются составной частью исследований, проводимых на кафедре "Электрические системы" Белорусского политехнического института.

Цель работы заключается:

- в разработке принципов построения электропередач с одно-временной передачей электроэнергии переменным и постоянным током по общему СПК, распределенных сверхпроводящих накопителей энергии, конструкций кабелей для их реализации и коммутационных устройств;
- в создании методики и алгоритмов определения технических и экономических характеристик электропередач с одно-временной передачей электроэнергии переменным и постоянным током, сверхпроводящих коммутационных устройств и их исследовании;
- в исследовании накопительной способности распределенных сверхпроводящих накопителей энергии и определении их экономической эффективности.

Методика исследования. Разработка методики определения технических и экономических параметров СПК



совмещенных электропередач и коммутационных устройств осуществ -  
лялась на основе математических моделей, соответствующих физи -  
ческим свойствам описываемых ими процессов. Задача оптимизации  
распределения мощности между цепями переменного и постоянного  
тока в совмещенной электропередаче решена методом динамического  
программирования. При выполнении исследований широко использо -  
вались современные вычислительные машины (ЕС ЭВМ) и их матема -  
тическое обеспечение.

Н о в ы е н а у ч н ы е р е з у л ь т а т ы , п о л u ч e н н ы e а v t o p o m :

- разработаны электропередачи с одновременной передачей элект -  
роэнергии переменным и постоянным током, конструкции, методики  
и алгоритмы определения технических и экономических параметров  
предложенных для них СПК;

- разработаны схемы электропередач распределенных сверхпро -  
водящих накопителей энергии, исследована их накопительная опо -  
сособность и определена экономическая эффективность;

- предложены коммутационные устройства для электропередач с  
СПК, разработана методика и алгоритмы определения технических  
и экономических характеристик, проведено их исследование;

- получен критерий и проявлена количественная оценка эко -  
номической конкурентоспособности электропередач, совмещающих пе -  
редачу электроэнергии переменным и постоянным током, со сверх -  
проводящими электропередачами переменного тока, предложен метод  
оптимального распределения мощности между цепями переменного и  
постоянного тока в совмещенной электропередаче.

Н а з а щ и т у в н o s y e т o s s л e д u ю щ и e o s n o v n ы e п o л o ж e н и я :

1. Принципы построения и алгоритмы для технико-экономиче -  
ских расчетов электропередач с одновременной передачей элект -  
роэнергии переменным и постоянным током по общему СПК, конст -  
рукции, методика и алгоритмы определения параметров разработан -  
ных для них кабелей.

2. Принципы построения и особенности расчета параметров рас -  
пределенных сверхпроводящих накопителей энергии, результаты ис -  
следования их накопительной способности.

3. Коммутационные устройства для электропередач с СПК, прин -  
ципы их расчета и результаты технико-экономических исследований.

4. Критерий экономической конкурентоспособности совмещенных электропередач со сверхпроводящими электропередачами переменного тока и метод оптимизации распределения мощности между цепями переменного и постоянного тока.

Практическая ценность работы заключается в разработке новых схем сверхпроводящих электропередач и коммутационных устройств, создании алгоритмов и программ для расчета и исследования технико-экономических характеристик совмещенных электропередач и СПК для них, определении области их целесообразного применения, получении результатов накопительной способности СПК, разработке инженерной методики расчета технико-экономических показателей коммутационных устройств для сверхпроводящих электропередач. Основные технические решения, предложенные в работе, выполнены на уровне изобретений и защищены 7 авторскими свидетельствами.

Результаты выполненных исследований направлены на повышение экономической эффективности электропередач с СПК, могут быть использованы проектными и научно-исследовательскими организациями при перспективном проектировании развития систем электро-снабжения.

Реализация результатов работы. Принципы устройства совмещенных электропередач, методика расчета параметров их элементов и результаты исследований использованы Государственным научно-исследовательским энергетическим институтом им. Г.М.Кржижановского (ЭНИИ) при разработке и исследовании сверхпроводящих электропередач и Сибирским научно-исследовательским институтом энергетики (СибНИИЭ) для формирования требований и разработки концевых устройств электропередач. Исследования по экономической эффективности распределения энергии сверхпроводящих накопителей энергии использованы проектным институтом "Минскийпроект" при технико-экономическом обосновании перспективной схемы электроснабжения г.Минска. Алгоритмы и программы расчета на ЭВМ используются в дипломном проектировании и учебно-исследовательской работе кафедры "Электрические системы" Белорусского политехнического института.

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы доложены, обсуждены и получили положительные отзывы на втором научном симпозиуме "Математическое и физиче-

ское моделирование процессов в криогенных кабелях" (Москва, 1981), всесоюзной межвузовской научно-технической конференции "Снижение потерь в электроэнергетических системах" (Баку, 1981), III республиканской научно-технической конференции "Современные проблемы энергетики" (Киев, 1980), республиканском научно-техническом семинаре "Технико-экономические проблемы электрических систем" (Минск, 1980, 1981), XXXVI-XXXVII конференциях профессорско-преподавательского состава Белорусского политехнического института совместно с работниками промышленности (Минск, 1980, 1981), на научно-технической конференции Гомельского политехнического института (Гомель, 1982).

**П у б л и к а ц и и .** Основное содержание и результаты диссертационной работы освещены в 7 печатных работах, защищены 7 авторскими свидетельствами и включены в 4 научно-технических отчета, зарегистрированных во Всесоюзном центре научно-технической информации.

**С т р у к т у р а р а б о т ы .** Диссертация состоит из введения и четырех глав, изложенных на 104 страницах машинописного текста, 33 рисунков, 3 таблиц, списка литературы, включающего 124 наименования, и приложений.

#### ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

**В о в в е д е н и и** обоснована актуальность проблемы, сформулированы цель и задачи исследований, приведены новые научные результаты и основные положения диссертационной работы.

**П е р в а я г л а в а** посвящена разработке и качественному анализу сверхпроводящих электропередач с одновременной передачей электроэнергии переменным и постоянным током, схем распределенных сверхпроводящих накопителей энергии на СПК переменного и постоянного тока и исследованию накопительной способности кабелей разных конструкций.

На основе сделанного критического обзора известных конструкций и схем включения СПК переменного тока в электропередачу, анализа их достоинств и недостатков установлено, что СПК переменного тока со сверхпроводниками II рода имеют сравнительно низкие технико-экономические показатели. Вместе с тем сверхпроводниковый материал из-за потерь на переменном токе, сильно зависящих от напряженности магнитного поля и влияющих на стоимость рефри-

жераторных установок, значительно недоиспользуется по своим свойствам.

Используя отсутствие потерь на постоянном токе и малое его влияние на предельно передаваемый по сверхпроводнику переменный ток, в работе на основе предложенных конструкций разработаны электропередачи, совмещающие передачу электроэнергии переменным и постоянным током по общему кабелю. При этом загрузив сверхпроводник переменным током так, чтобы напряженность переменного магнитного поля на его поверхности не превышала некоторого значения, при котором величина потерь активной мощности приемлема, можно дополнительно передавать по жесткому сверхпроводнику определенную мощность на постоянном токе.

Отличительными особенностями предложенных конструкций СПК от пофазно-коаксиальных является наличие в одной из них дополнительного сверхпроводящего проводника, охватывающего коаксиальные проводники всех трех фаз, и в другой - нанесение сверхпроводящего материала на трубы-каналы обратного потока криоагента. При этом передача мощности на переменном токе осуществляется по внутренним и внешним либо только по внутренним коаксиальным проводникам. Для передачи мощности на постоянном токе один полюс преобразовательных выпрямительной и инверторной подстанций подключается к собранным в нейтраль внешним коаксиальным проводникам, а второй полюс - к дополнительному сверхпроводящему проводнику или соединенным параллельно трубам-каналам обратного потока криоагента.

Дополнительная загрузка внешних коаксиальных проводников постоянным током позволяет более эффективно, по сравнению с СПК переменного тока, использовать сверхпроводниковый материал и холодную зону кабеля, увеличивая его пропускную способность. Разработанные электропередачи могут быть реализованы при проектировании глубоких вводов систем электроснабжения.

Повышение уровня загрузки сверхпроводящего материала тоже требует более тщательного контроля его сверхпроводящего состояния. Для контроля сверхпроводимости объектов с нанесенным на шунтирующую подложку слоем сверхпроводника разработано простое устройство, выполненное на основе датчика Холла. При этом используется эффект отсутствия тока в подложке при сверхпроводящем состоянии сверхпроводящего материала и его появлении

в ней при нормальном состоянии сверхпроводника.

В работе предложены электропередачи распределенных сверхпроводящих накопителей энергии на СПК постоянного тока, способные передавать и одновременно аккумулировать энергию и состоящие из двух частей I и II, каждая из которых содержит линии-накопители и подсоединенные к ним и к источникам питания и потребителям переменного тока сверхпроводящие и обычные преобразователи выпрямительной и инверторной подстанций. При этом аккумулирование энергии осуществляется в электромагнитном поле замкнутых контуров, каждый из которых образован двумя кабелями одной полярности, соединенными по концам через сверхпроводящие преобразователи. Кроме того, в одной из предложенных электропередач источник и (или) потребитель каждой части сети с помощью дополнительных линий через сверхпроводящие преобразователи подключены к линиям-накопителям другой части сети. Это позволяет эффективнее использовать мощность источников питания и накопленную энергию как в нормальном, так и в аварийном режимах. В другой электропередаче дополнительными сверхпроводящими линиями через сверхпроводящие выключатели, подключенные к обоим выводам сверхпроводящих преобразователей, линии-накопители одной полярности разных частей I и II связаны между собой. В результате этого обеспечивается непрерывность процесса передачи, накопления и хранения энергии при плановых или вынужденных отключениях любого участка основной линии-накопителя каждой части сети.

В рассматриваемых схемах требуется преобразование всей передаваемой и аккумулируемой энергии из переменного тока в постоянный и наоборот, для чего необходимы дорогие преобразователи большой мощности. Создание распределенного накопителя энергии на СПК постоянного тока связано также с увеличением его стоимости. На основе сравнительной оценки получены предельные величины удорожания СПК постоянного тока на создание накопителя для покрытия пиковых нагрузок, при которых он будет экономически конкурентоспособен с газотурбинными электростанциями. При накопительной способности кабеля  $0,1-5,0$  МВт.ч/км они составляют  $1,5-80$  тыс.руб/км.

Для повышения эффективности систем электроснабжения нами разработана схема распределенного сверхпроводящего накопителя энергии на СПК переменного тока. Основное количество энергии



здесь передается на переменном токе по внутренним и внешним линиям только по внутренним коаксиальным проводникам. Одновременно внешние коаксиальные проводники вместе со сверхпроводящими преобразователями образуют замкнутый контур для постоянного тока, т.е. накопитель энергии. В работе приводятся несколько разновидностей схем, которые могут быть использованы для глубоких вводов и в кольцевой сети системы электроснабжения города.

Эффективность распределенного сверхпроводящего накопителя энергии в определяющей степени зависит от накопительной способности кабеля. В работе приведено ее исследование для СПК разных конструкций: кабелей пофазно-коаксиальной конструкции с покрытыми сверхпроводящим слоем трубами-каналами, заключенными в общий или индивидуальный магнитный экран, и кабелей постоянного тока со спирально нанесенным сверхпроводником. Определены конструкции с наибольшей накопительной способностью.

Во второй главе разработаны и исследованы коммутационные устройства для электропередач с СПК.

Возможное применение электропередач с СПК, которые характеризуются низкими реактивными и нулевыми активными сопротивлениями, приведет к дальнейшему увеличению и без того высоких уровней токов короткого замыкания, что неизбежно отразится на более высоких требованиях, предъявляемых к коммутационным устройствам. Наряду с традиционными для таких электропередач должны разрабатываться и сверхпроводящие коммутационные устройства, имеющие в ряде случаев технические и экономические преимущества.

В результате выполненного в работе обзора выявлено, что большинство сверхпроводящих коммутационных устройств разработаны для различных электрофизических установок и имеют параметры, неприемлемые для использования в электропередачах. При этом наибольшее внимание уделяется устройствам, принцип действия которых основан на фазовом переходе материала сверхпроводник-несверхпроводник.

Для одного из них: бесконтактного сверхпроводящего коммутационного устройства активного типа с непосредственным включением в электропередачу, с целью выяснения возможных технических параметров и экономических характеристик, в работе приведена методика их определения. Основными элементами рассматриваемого устройства являются переходный элемент, устройство управления,

состоящее из сверхпроводящего экрана, обмотки отключения и источников их питания, электро- и теплоизоляция и холодильная установка.

Параметры переходного элемента, выполненного в виде бифилярно уложенной электрически изолированной сверхпроводниковой ленты, выбираются из условий обеспечения пропуска рабочих и аварийных токов, нормального функционирования аппарата, создающего видимый разрыв, и надежной термостабилизации его в отключенном положении. Математически их можно представить следующим образом:

$$F_{сн} = \frac{k_I \cdot S_p}{\sqrt{3} \cdot U \cdot j_k} \quad (1)$$

$$R_{min} = \frac{U}{F_{сн}} \sqrt{\frac{h_{сн} \cdot \rho_n}{2 q_{пр}}} \quad (2)$$

$$\frac{\Delta P}{S_n} \leq q_{пр} \quad (3)$$

где  $k_I$  - коэффициент запаса по току;  $j_k$  - критическая плотность тока;  $U$  - напряжение на переходном элементе;  $S_p$  - расчетная мощность электропередачи;  $h_{сн}$  - толщина сверхпроводниковой ленты;  $\rho_n$  - сопротивление ленты в нормальном состоянии;  $q_{пр}$  - предельно возможная мощность, которую может отвести криоагент;  $\Delta P$  - тепловыделения в сверхпроводнике;  $S_n$  - поверхность переходного элемента, охлаждаемая криоагентом.

В работе определены технические параметры и получены выражения технико-экономических характеристик отдельных элементов и коммутационного устройства в целом. В результате обработки на ЭМ технико-экономических показателей получено следующее корреляционное выражение для капитальных затрат в зависимости от расчетной мощности и напряжения:

$$K_{снв} = a_0 \cdot S^d (a + bU + cU^2) \quad (4)$$

где  $a_0$ ,  $a$ ,  $b$ ,  $c$ ,  $d$  - коэффициенты.

Проведенными исследованиями установлено, что стоимость рассматриваемого устройства в определяющей степени зависит от критической плотности тока  $j_{к}$  и сопротивления сверхпроводника в нормальном состоянии  $\rho_{н}$ . Анализ экономических характеристик показал, что даже при столь высоких параметрах материала переходного элемента, как  $j_{к} = 10^{10} - 10^{11}$  А/м<sup>2</sup> и  $\rho_{н} = 0,31 - 0,1$  Ом.м, они значительно дороже обычных выключателей.

Более реальными в настоящее время представляются коммутационные устройства контактного механического действия. Основным элементом разработанного нами устройства для коммутации цепей переменного тока является вакуумная дугогасительная камера (ВДК), помещенная в криостат с криоагентом. В нем же снаружи ВДК дополнительно включены сверхпроводящие контакты. При этом они играют роль рабочих, а обычные контакты ВДК служат для включения, отключения и гашения рабочих и аварийных токов. Высокая отключающая способность ВДК лучших мировых образцов и доказанная рядом известных работ работоспособность механически соприкасающихся сверхпроводящих контактов позволяет рассматривать их как эффективное коммутационное устройство для сверхпроводящих электропередач.

На основе разработанной методики расчета и проведенных оценок получено, что при коммутации сверхпроводящих электропередач дополнительные затраты, необходимые для создания и нормальной работы сверхпроводящего выключателя с ВДК при токах отключения 100-300 кА, хотя и превышают стоимость обычных выключателей, но меньше необходимых при этом тоководных устройств, связанных с тепловой и холодной зонами.

В третьей главе предложена методика определения технико-экономических показателей совмещенных электропередач и используемых для них СПК, приведены результаты их исследований. Здесь же отражены особенности расчета параметров кабелей для распределенных сверхпроводящих накопителей энергии.

СПК совмещенных электропередач имеют ряд конструктивных и режимных особенностей, которые требуют развития и дополнения известной методики расчета параметров кабелей переменного тока. При использовании внутреннего проводника коаксиальных фаз только для передачи переменного тока, его оптимальный диаметр для напряжений 10-220 кВ определяется линейной зависимостью от мощ-

ности. Диаметр внешнего коаксиального проводника найден по наибольшему значению из двух следующих условий: по электрическим характеристикам электроизоляции и по передаче заданной мощности постоянного тока и переменного. Рост напряженности магнитного поля внешнего проводника за счет постоянной составляющей повышает индукцию магнитного поля на поверхности проводника и глупину ее проникновения в сверхпроводник, что требует увеличения толщины слоя сверхпроводникового материала.

Стоимость кабеля определена на основе поэлементного учета каждой составляющей. При этом общее выражение имеет вид:

$$K_{с\text{пк}} = (K_{с\text{п}} + K_{э\text{и}} + K_{х\text{а}} + K_{т\text{и}} + K_{р\text{в}} + K_{п}) \cdot K_{\text{м}}, \quad (5)$$

где  $K_{с\text{п}}$ ,  $K_{э\text{и}}$ ,  $K_{х\text{а}}$ ,  $K_{т\text{и}}$ ,  $K_{р\text{в}}$ ,  $K_{п}$  — соответственно затраты на сверхпроводник, электроизоляцию, криоагент, тепло — изоляцию, рефрижераторные установки и материал подложки;  $K_{\text{м}}$  — коэффициент, учитывающий затраты на монтаж кабеля.

Для оценки технико-экономических параметров СПК совмещенных электропередач в соответствии с разработанным алгоритмом составлена программа для ЕС ЭВМ. В результате проведенных исследований установлено следующее.

Одновременная передача электроэнергии переменным и постоянным током расширяет экономическую область более низких напряжений цепи переменного тока. Так, если для кабелей переменного тока напряжением 20 кВ выгоднее, чем 110 кВ при  $P < 150$  МВт, то при одновременной передаче с  $\alpha = P_{\text{пост}} / (P_{\text{пост}} + P_{\text{пер}}) = 0,5$  граничное значение составляет 400 МВт. Удельные капитальные затраты на единицу передаваемой мощности для СПК совмещенных электропередач значительно ниже и по отношению к кабелю переменного тока при  $\alpha = 0,5$  составляют при напряжениях цепи переменного тока: 10 кВ — 40–50%; 20 кВ — 35–50%; 110 кВ — 70–80%. Наибольшая часть затрат в СПК напряжением цепи переменного тока  $U_{\text{пер}} = 10\text{--}20$  кВ приходится на рефрижераторные станции, а при  $U_{\text{пер}} = 110\text{--}220$  кВ — на криоагент и рефрижераторные станции. При этом влияние напряжения цепи постоянного тока незначительно.

Для исследования совмещенных электропередач, их сравнительного сопоставления с электропередачами переменного тока разработан алгоритм, учитывающий технико-экономические характеристи-

ки выключателей, трансформаторов, преобразователей, компенсирующих устройств и сверхпроводящих кабелей, по которому составлена программа для ЕС ЭМ. Так как применение СПК переменного тока требует усложнения и удорожания коммутационной аппаратуры, и из-за передачи части мощности на постоянном токе результирующее значение токов короткого замыкания снижается, ожидаемая стоимость выключателей переменного тока для совмещенных электропередач представляется следующим выражением:

$$K_0 = \frac{P_{пер}}{P_{пер} + P_{пост}} \cdot K'_0 \quad (6)$$

где  $K'_0$  — стоимость выключателя в электропередаче с СПК переменного тока.

Пропускная способность СПК переменного тока, используемых в качестве глубоких вводов, значительно превышает их натуральную мощность, в результате чего для передачи активной мощности необходима дополнительная реактивная мощность. В совмещенной электропередаче, где часть мощности передается на постоянном токе, мощность компенсирующих устройств, требуемая для покрытия потерь в СПК, меньше и определяется выражением

$$Q_{нч} = \left( \frac{P_{пер} \rho n a}{2\pi U_{пер}^2} \sqrt{\frac{\mu_0 \mu}{\epsilon_0 \epsilon}} - \frac{2\pi U_{пер}^2 \sqrt{\epsilon_0 \epsilon}}{\rho n a} \right) \omega \sqrt{\mu_0 \mu \epsilon_0 \epsilon} l_{свч} \quad (?)$$

где  $\mu_0$ ,  $\epsilon_0$  — магнитная и диэлектрическая постоянные;  $\mu$ ,  $\epsilon$  — магнитная и диэлектрическая проницаемость;  $l_{свч}$  — длина СПК;  $a$  — отношение диаметров внешнего и внутреннего коаксиальных проводников.

Расчетами, проведенными для моделей глубоких вводов, в которых источниками питания являются генераторы только переменного тока или переменного и постоянного тока, установлено влияние величин и соотношения мощностей, передаваемых по цепям переменного и постоянного тока, на стоимость передачи электроэнергии.

При исследовании СПК распределенных сверхпроводящих накопителей энергии определено, что для накопителя, покрывающего шиковую часть суточного графика нагрузки и характеризующегося реж-

мом заряда при постоянстве напряжения, величина последнего мала и не оказывает практического влияния на выбор зависящих от него параметров СПК. Поэтому основное удорожание кабеля в схеме накопителя, предварительно рассчитанного на передачу заданной мощности, связано с дополнительным пропусканьем через него аккумуляруемого тока и затратами на магнитный материал.

В четвертой главе основное внимание уделено исследованию технико-экономических закономерностей электропередач с СПК в системах электроснабжения крупных городов. В ней разработан критерий экономической конкурентоспособности совмещенных электропередач с электропередачами переменного тока, решена задача оптимального распределения мощности в совмещенной электропередаче между цепями переменного и постоянного тока, проведены исследования по оценке экономической эффективности распределенного сверхпроводящего накопителя энергии на СПК переменного тока в системе электроснабжения г.Минска на уровне 2000-2010 годов.

Из-за более высокой стоимости электрооборудования подстанций электропередачи постоянного тока становятся экономически выгоднее электропередач переменного тока только при длинах, больших некоторого граничного значения. Это справедливо и для совмещенных электропередач с СПК. В работе получено уравнение граничной длины, разделяющей экономические области совмещенных электропередач и электропередач переменного тока, которое имеет следующий вид:

$$\rho_r = \frac{\rho_n (\alpha_0'' + d \rho_{\Sigma} (\alpha_1'' - \alpha_1 \cos^{-1} \varphi)) + \rho_l ((c_1 - c_1') + (c_2 - c_2') \rho_{\Sigma} + (c_3 - c_3') \rho_{\Sigma}^2) + \frac{\beta (\Delta \rho_{пт} \rho_{пт} T + \Delta \rho_{ку} d \rho_{\Sigma} T_{ку})}{\beta \Delta \rho_{\Sigma}^2 T h (d (1/d_1^2 + 1/d_{2одн}^2) + (1/d_{2пер}^2 - 1/d_{2одн}^2))} \quad (8)$$

где  $\rho_n$  и  $\rho_l$  - коэффициенты ежегодных отчислений от затрат на подстанции и линии, включающие нормативный коэффициент эффективности и нормы на амортизацию и эксплуатацию;  $d = \rho_{пер} / (\rho_{пер} + \rho_{одн})$ ;  $\alpha_0''$ ,  $\alpha_1''$  - часть стоимости подстанции постоянного тока, не зависящая и зависящая от ее мощности;

$a_1$  - часть стоимости подстанций переменного тока, зависящая от ее стоимости;  $c_1, c_2, c_3, c'_1, c'_2, c'_3$  - коэффициенты уравнения регрессии стоимости СИК переменного тока и совмещенной электропередачи;  $\Delta P_{пт}, \Delta P_{ку}$  - коэффициенты потерь в преобразователях и компенсирующих устройствах;  $P_{пт}$  - мощность преобразовательной подстанции;  $\beta$  - стоимость 1 кВт.ч потерянной электроэнергии;  $\tau$  - время максимальных потерь;  $h$  - коэффициент эффективности систем охлаждения;  $d_{2лвр}$  и  $d_{2одн}$  - диаметры внешнего коаксиального проводника СИК переменного тока и совмещенной электропередачи;  $T_{ку}$  - время работы компенсирующего устройства;  $T$  - время работы преобразовательной подстанции;  $A = 4\sqrt{2} \mu_0 f / 3\sqrt{3} \pi^2 \mu U_{пер} \cos^3 \varphi$ .

Граничные длины для рассматриваемых моделей совмещенных электропередач приведены в табл. I.

Таблица I

Рассматриваемая модель	Граничная длина (км) при напряжении цепи переменного тока		
	10 кВ	20 кВ	110 кВ
С одной преобразовательной подстанцией	8-9	16-18	45-55
С двумя преобразовательными подстанциями	14-16	30-32	100-110

При проектировании совмещенных электропередач заданной пропускной способности важно распределить общую мощность между цепями переменного и постоянного тока таким образом, чтобы обеспечивался минимум стоимости передачи 1 кВт.ч электроэнергии. В работе сформулирована и решена задача оптимального распределения мощности в совмещенной электропередаче методом динамического программирования, который позволяет получить решение для совокупности исходных нагрузок электропередач и их длин.

Целевая функция имеет вид

$$Z = \sum_{i=1}^n z_i(P_i), \quad (9)$$

где  $z_i$  - функция приведенных затрат для  $i$ -й цепи;  $P_i$  - мощность  $i$ -й цепи.

Математическая задача оптимизации формулируется так:

$$\min \sum_{i=1}^n Z_i(P_i), \quad (10)$$

при ограничениях

$$\sum P_i = P_{\Sigma}, \quad (11)$$

$$P_i \leq P_{i \max}, \quad (12)$$

$$P_i > 0. \quad (13)$$

Исследованиями установлено, что относительная величина мощности  $\alpha_{opt}$ , передаваемая на постоянном токе, повышается как при увеличении длины совмещенной электропередачи, так и суммарной ее пропускной способности. Например, для модели с одной преобразовательной подстанцией с  $U_{пер} = 20$  кВ при суммарной мощности  $P_{\Sigma} = 800$  МВт и длине СПК  $l_{спк} = 13$  км  $\alpha_{opt} = 0,1$ , а при  $l_{спк} = 15$  км  $\alpha_{opt} = 0,5$ . Для той же модели с  $U_{пер} = 110$  кВ и длине линии 70 км при  $P_{\Sigma} = 1800$  МВт  $\alpha_{opt} = 0,25$ , а при  $P_{\Sigma} = 2400$  МВт  $\alpha_{opt} = 0,45$ .

Для части системы электроснабжения г.Минска с нагрузками на уровне 2000–2010 годов проведена сравнительная оценка эффективности распределенного сверхпроводящего накопителя энергии с вариантами электроснабжения маслонаполненными кабелями и покрытием максимальной нагрузки пиковыми электростанциями. Полученный экономический эффект от распределенного накопителя энергии на СПК переменного тока составляет более 3,5 млн.руб. по приведенным затратам.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В соответствии с поставленной целью и задачами исследований в диссертационной работе получены следующие основные результаты:

1. Разработаны принципы создания и схемы электропередач с одновременной передачей электроэнергии переменным и постоянным током по обходу СПК. Для их реализации предложены конструкции коаксиальных кабелей с дополнительной общей сверхпроводниковой жилой и покрытыми сверхпроводящим материалом трубами–каналами



обратного потока криоагента.

2. Предложены схемы распределенного сверхпроводящего накопителя энергии на СПК постоянного и переменного тока, одновременно участвующих в передаче электроэнергии. Они обладают высоким коэффициентом полезного действия и оыстродействием перевода из режима зарядки в режим хранения и выдачи энергии и могут быть использованы как эффективные средства для покрытия пиковой нагрузки оистем электроснабжения.

3. Исследована накопительная способность СПК переменного и постоянного тока. Определены конструктивные решения, обладающие наибольшей накопительной способностью. Данные исследования необходимы при выборе оптимальных конструкций СПК для схем распределенных сверхпроводящих накопителей энергии и поиске направлений увеличения их накопительной способности.

4. Разработана методика для исследования технико-экономических характеристик сверхпроводящих бесконтактных коммутационных устройств. Определено влияние параметров сверхпроводящего материала переходного элемента на их стоимость. Установлено, что для создания экономически приемлемых выключателей для коммутации электропередач необходимы материалы с высокой критической плотностью тока и большим сопротивлением в нормальном состоянии.

5. Предложено сверхпроводящее коммутационное устройство переменного тока с вакуумной дугогасительной камерой и двумя парами механически соприкасающихся контактов, одна из которых — сверхпроводящая. На основе проведенных по разработанной методике исследований установлено, что использование его для коммутации сверхпроводящих электропередач экономически эффективнее обычных выключателей в сочетании с токовводными устройствами.

6. Развита и дополнена методика определения технических и экономических показателей СПК переменного тока с целью применения ее для расчета кабелей совмещенных электропередач. Проведен сравнительный анализ стоимости СПК совмещенных электропередач и электропередач переменного тока и установлено, что кабели совмещенных электропередач имеют более высокие технико-экономические показатели.

7. Разработан алгоритм и программа расчета на ЕС ЭВМ технико-экономических характеристик совмещенных электропередач. Вы-

полнены исследования, позволившие установить значения граничной длины, разделяющей экономические зоны совмещенных электропередач и электропередач переменного тока. Они позволяют выбирать оптимальный тип электропередачи на стадии проектирования.

8. Сформулирована и решена задача оптимального распределения мощности в совмещенной электропередаче между цепями переменного и постоянного тока методом динамического программирования. Определены численные значения оптимальных коэффициентов в зависимости от длины и пропускной способности электропередачи, которые обеспечивают минимум стоимости передачи электроэнергии.

9. Проведено исследование и установлена экономическая эффективность распределенных сверхпроводящих накопителей энергии на СПК переменного тока в перспективной схеме электроснабжения г. Минска для покрытия пиковых нагрузок.

Основное содержание диссертации отражено в следующих работах:

1. Лычев П.В. Коммутационные устройства для криогенных электропередач переменного тока. - Известия вузов СССР. Энергетика, 1981, № 7, с.12-15.

2. Федин В.Т., Лычев П.В. Повышение эффективности использования сверхпроводящего материала токопроводов генераторного напряжения. - В сб.: Создание сверхпроводящего токопровода генераторного напряжения. - М.: ЭНИН, 1981, с.14-16.

3. Лычев П.В. Методика расчета и исследование технико-экономических показателей криогенных бесконтактных выключателей. - Минск, 1981. -17 с. - Рукопись представлена журналом Известия вузов СССР. Энергетика. Деп. в Информэлектро 13 апреля 1981, № 39Д/1-156.

4. А.с. № 856341 (СССР). Устройство для контроля сверхпроводимости /А.Н.Дятель, П.В.Лычев. - Опубл. в БИ, 1981, № 30.

5. А.с. № 873843 (СССР). Энергосистема /В.Т.Федин, П.В.Лычев. - Опубл. в БИ, 1981, № 38.

6. Лычев П.В. К снижению потерь мощности в питающих городских сетях с высокой плотностью нагрузки. -В сб.: Снижение потерь в электроэнергетических системах. -Баку, 1981, с.151.

7. А.с. № 878145 (СССР). Энергосистема /В.Т.Федин, П.В.Лычев. -Опубл. в БИ, 1981, № 40.

8. А.с. № 900767 (СССР). Коммутационное устройство /В.Т.Федин, П.В.Лычев. -Опубл. в БИ, 1982, № 3.

9. Федян В.Т., Лычев П.В. Повышение пропускной способности и эффективности использования токопроводящих материалов криогенных электропередач. -В кн.: Научные и прикладные проблемы энергетики. Вып.9. -Минск, Вышэйшая школа, 1982, с.11-16.

10. Федян В.Т., Лычев П.В. Энергосистема. -Положительное решение по заявке № 2925077/07 от 16 мая 1980 г.

11. Федян В.Т., Лычев П.В. Сверхпроводящий выключатель. -Положительное решение по заявке № 2890764/07 от 3 марта 1980 г.

12. Федян В.Т., Лычев П.В. Электропередача. -Положительное решение по заявке № 2914906/07 от 24 апреля 1980 г.

13. Гончаров В.М., Лычев П.В. Оценка снижения потерь мощно - сти и энергии в электрических системах с криогенными элементами. -В об.: Снижение потерь в электроэнергетических системах. -Баку, 1981, с.50-51.

14. Федян В.Т., Лычев П.В. Прогнозирование стоимости коммутационного электрооборудования повышенной отключающей способности. -В об.: Современные проблемы энергетики. Ч.3. -Киев, 1980.

15. Принципы формирования электрических схем сверхпроводящих электропередач переменного и постоянного тока и сверхпроводящих кабельных систем. Руководитель Поспелов Г.Е. Исп. Лычев П.В. Отчет янв. № Б785675. -Минск, БПИ, 1979.

16. Энергоэкономический анализ сверхпроводящих систем выдачи мощности электростанций и электрооснащения крупных городов. Руководитель Поспелов Г.Е. Исп. Лычев П.В. Отчет янв. № Б822020. -Минск, БПИ, 1979. -104 с.

17. Обзор и анализ перспективных технических решений по элементам для криогенной электроэнергетической системы. Руководитель Поспелов Г.Е. Исп. Лычев П.В. Отчет янв. № Б785666. -Минск, БПИ, 1979. -159 с.

18. Разработка принципов формирования вариантов криогенных электроэнергетических систем. Руководитель Поспелов Г.Е. Исп. Лычев П.В. Отчет янв. № Б903828. -Минск, БПИ, 1980. -115 с.



Петр Васильевич ЛЫЧЕВ

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧ  
СО СВЕРХПРОВОДЯЩИМИ КАБЕЛЯМИ В СИСТЕМАХ  
ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ КРУПНЫХ ГОРОДОВ

05.14.02 – Электрические станции (электрическая  
часть), сети и системы и управление ими

А в т о р е ф е р а т  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Корректор Е.И.Адамущко.

Подписано в печать 19.05.82.

Формат 60x84<sup>1</sup>/16. Бумага т.№ 2. Офс.печать.

Усл.печ.л. I,II. Уч.-изд.л. 0.86. Тир.100. Зак.17. Бесплатно.

Отпечатано на ротэпринте БНИ. 220027, Минск, Ленинский пр., 65.